Kleuren elektronisch weergeven

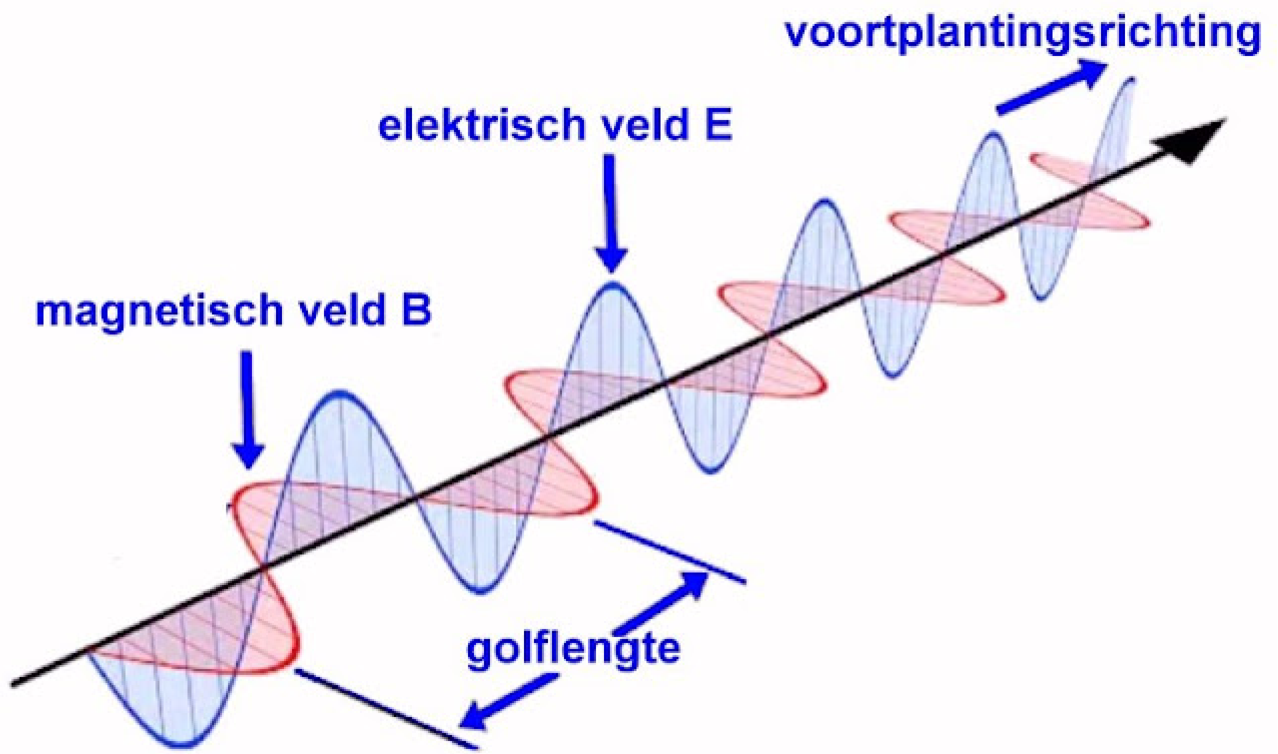
De kleuren op uw beeldscherm komen vaak niet overeen met de kleuren op een afdruk van uw printer. Logisch, want het natuurgetrouw elektronisch reproduceren van de kleuren op een monitor en op een vel papier is niet zo eenvoudig als het lijkt.

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 11-08-2024

Achtergrondinformatie over licht en kleuren

Problemen bij kleuren elektronisch weergeven
U hebt uiteraard een kleurenprinter volgens de inktjet- of laser-technologie in huis of op kantoor. Als u een foto die er op uw scherm schitterend uitziet afdrukt op uw kleurenprinter, kan het voorkomen dat de resultaten op papier tamelijk teleurstellend zijn. Een bepaalde kleur verschijnt als een geheel andere tint op het papier. Dergelijke problemen zijn niet zo verbazingwekkend, want bij het afdrukken in kleur komt heel wat kijken, veel meer dan de leek denkt!
Het grootste probleem is dat de kleurweergave op uw monitor heel anders werkt dan de kleuropbouw van een kleurenprinter. Als u professioneel met kleur aan de slag wilt, moet u eerst wat beginselen van de kleurentheorie begrijpen.

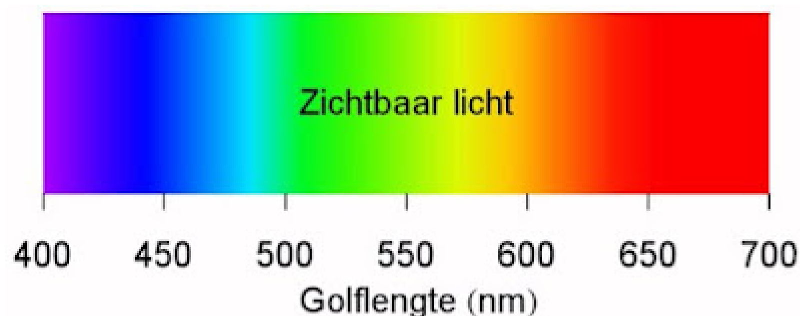
Het licht, een elektromagnetisch golfverschijnsel
Kleuren zijn alleen waarneembaar als er licht is. Licht is een van de vele manieren waaronder het zeer fundamentele natuurkundig verschijnsel '*elektromagnetisch golfverschijnsel*' zich kenbaar maakt. Golven zijn een algemeen bekend begrip, denk maar aan de golven die door de zee op het strand worden geworpen. Het fundamentele verschil tussen deze watergolven en de elektromagnetische golven van het licht is dat de eerste soort '*materieel*' aanwezig is, dus voelbaar, terwijl de tweede soort niet tastbaar is, maar door alle op aarde aanwezige levensvormen alleen met sommige organen waar te nemen is als licht of warmte.
Een elektromagnetische golf wordt verondersteld te ontstaan in en zich voort te planten door de ruimte dank zij het bestaan van elektrische en magnetische velden. In de onderstaande figuur is een voorstelling van dit verschijnsel getekend. Een elektrische veld E wekt een magnetisch veld B op. Dit veld wekt op haar beurt weer een elektrisch veld op, etc. Op deze manier verspreidt het golfverschijnsel zich, met de lichtsnelheid, door de ruimte. Beide velden staan loodrecht op elkaar.



De voorstelling van een elektromagnetische golf.
(© Collegedunia, edit 2024 Jos Verstraten)

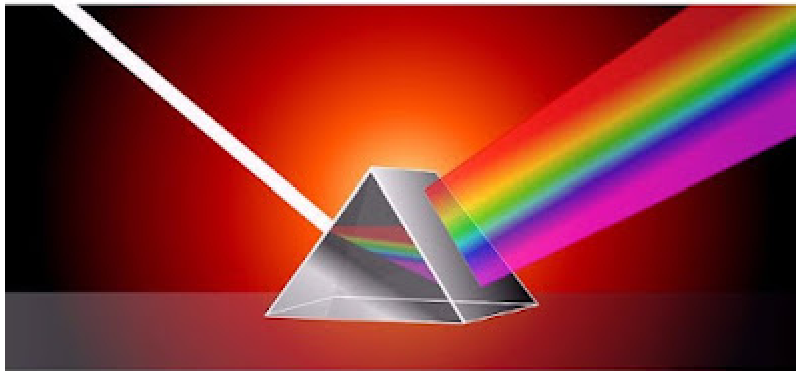
De golflengte van elektromagnetische straling
Golven hebben bepaalde eigenschappen, waarvan de voornaamste de golflengte is. Iedereen kent dit verschijnsel, immers watergolven hebben toppen en dalen. Het ligt voor de hand dat de golflengte van een golf de afstand is tussen twee opeenvolgende toppen of twee opeenvolgende dalen. De eenheid van golflengte is dan ook de meter. Het probleem bij elektromagnetische golven is dat deze niet als dusdanig zichtbaar zijn en u de golflengte dus niet kunt meten met een meetlat. Toch heeft men apparatuur ontwikkeld, waarmee de golflengte van die onzichtbare elektromagnetische golven heel nauwkeurig is te meten. En wat blijkt dan? Dat de waarde van de golflengte rechtstreeks verband houdt met de kleur die onze hersenen interpreteren!

Kleur en golflengte
Elektromagnetische golven met een golflengte van 700 nm (afkorting van 700 nanometer, is gelijk aan 0,000.000.7 meter!) die in onze ogen binnen vallen, worden door onze hersenen ervaren als rood gekleurd licht. Elektromagnetische golven met een golflengte van 400 nm worden door onze hersenen ervaren als violet licht. Tussen die twee grenzen ligt het gehele spectrum van door de mens waarneembare kleuren, een spectrum dat maar al te goed bekend is van de regenboog.
Hiermee is dus de vraag beantwoord wat kleur is. Kleur is niets meer of minder dan de menselijke interpretatie van de golflengte van elektromagnetische straling.



De golflengte van de zichtbare elektromagnetische golven.
(© quantumuniverse)

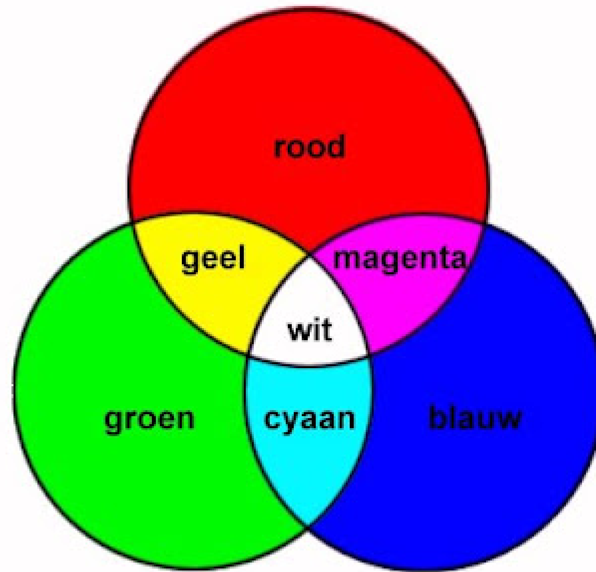
Wit licht
Naast alle mogelijke kleuren neemt de mens ook wit licht waar. Wat is wit licht? Wit licht heeft geen specifieke golflengte, maar bestaat uit een menging van elektromagnetische golven met ieder hun eigen specifieke golflengte. Wit is dus een mengkleur, een eigenschap die eeuwen geleden door de Engelse natuurkundige Newton werd ontdekt. Newton stuurde het licht van de zon door een prisma, een driehoekvormig stuk glas. Glas heeft de eigenschap dat het elektromagnetische golven van richting kan laten veranderen. De mate waarin dit verschijnsel zich voordoet is echter recht evenredig met de golflengte van de straling.
Het gevolg van een en ander is dat alle golflengten, die in wit licht aanwezig zijn, onder een andere hoek worden afgebogen en dus aan de andere kant van het prisma gescheiden uittreden. Stuurt u wit licht door een prisma, dan ontstaat aan de andere kant van het prisma een soort regenboog, die alle waarneembare kleuren bevat van donker rood tot donker paars.



De ontdekking van Newton.
(© Bhuvatrun, Wikimedia Commons)

Mengkleuren
Uit het experiment blijkt een belangrijke eigenschap van het menselijk brein. Valt een elektromagnetische golf met een typische golflengte binnen in ons oog, dan interpreteren wij dat als een bepaalde kleur. Deze kleurinterpretatie kan echter ook ontstaan als twee, drie, of meer golven binnen vallen met ieder een specifieke golflengte. In dit geval is er sprake van menging. Stel dat ons oog wordt getroffen door twee elektromagnetische golven, een '*groene*' en een '*rode*'. De termen '*groene*' en '*rode*' hebben uiteraard uitsluitend betrekking op de golflengten van de straling. Gehoor gevend aan de universele wetten van de natuurkunde, ontstaat er een menggolf met specifieke eigenschappen, die door ons brein geïnterpreteerd worden als zijnde een golf met een '*gele*' golflengte.

Primaire kleuren R, G en B
Het feit dat het menselijk brein ook mengingen van verschillende golflengten waarneemt als kleur is een zeer belangrijk gegeven. Zowel bij het produceren van kleuren op een beeldscherm als op een kleurenprinter wordt namelijk dankbaar gebruik gemaakt van dit verschijnsel. Men heeft ontdekt dat er drie primaire kleuren bestaan, waaruit door menging alle waarneembare kleuren kunnen worden samengesteld. Die primaire kleuren zijn rood, groen en blauw. Uit elektromagnetische golven met deze drie basis golflengten kunnen miljoenen kleurschakeringen worden samengesteld. Het volstaat de sterkte of intensiteit van de drie primaire kleuren te variëren. Even sterke intensiteiten rood en blauw licht geven een mengkleur, die door ons ervaren wordt als magenta. Voert u de intensiteit van de blauwe straling iets op, dan zal het magenta een blauwachtige verkleuring ondergaan.
Op dezelfde manier kunt u wit licht maken door een welbepaalde combinatie van rode, groene en blauwe golven te genereren, ieder met een specifieke intensiteit. Dit is het systeem dat in al uw beeldschermen wordt gebruikt en door het leven gaat onder het letterwoord '*RGB*'.



De drie primaire kleuren in het 'RGB-systeem'.
(© 2024 Jos Verstraten)

Additieve en subtractieve systemen
Bij het mengen van kleuren moet echter onderscheid worden gemaakt tussen '*additieve*' kleurgeneratie en '*subtractieve*' kleurgeneratie. Een zeer belangrijk onderscheid, want een monitor werkt bijvoorbeeld additief, maar een kleurenprinter subtractief. Als in de praktijk blijkt dat een geprint plaatje wat kleursamenstelling betreft absoluut niet lijkt op het mooi gekleurd plaatje op het beeldscherm, dan ontstaat dit probleem door het fundamentele verschil tussen additieve en subtractieve kleurmenging!

Additieve kleuren
Kleuren, die worden uitgestraald door een lichtbron, zijn additieve kleuren. Die additieve kleuren kunnen rechtstreeks in ons oog binnenvallen en geven dan een bepaalde kleurindruk. Stel dat u op het podium van een theater staat en dat er drie spot's op het podium gericht worden, die ieder een van de primaire kleuren uitstralen. Hoe meer licht er door die spot's wordt uitgestraald, hoe lichter de totaalindruk zal worden. De lichttechnicus kan nu de intensiteit van de drie spot's zelfs zo instellen, dat de indruk van wit licht ontstaat.
Additieve kleuren ontstaan dus door elektromagnetische golven op te wekken.
Beeldschermen werken additief, omdat zij licht uitzenden. Zoals reeds geschreven gaat dit systeem door het leven onder de naam '*RGB*'.

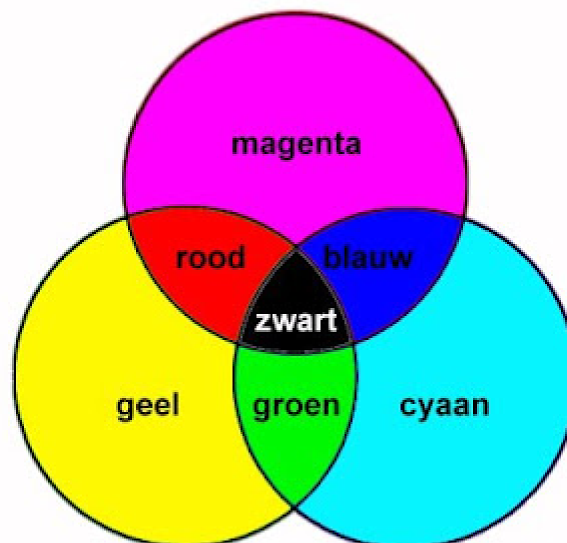
Subtractieve kleuren
Subtractieve kleuren ontstaan door lichtenergie te onttrekken. Dit is een natuurkundig verschijnsel dat enige toelichting behoeft. Een citroen zal altijd als geel worden ervaren, ondanks het feit dat deze vrucht absoluut geen lichtbron is. Hoe ontstaat dan deze gele kleur? Simpelweg, door reflectie. De citroen wordt door een lichtbron, bijvoorbeeld de zon, beschenen. De moleculen, waaruit de schil van de citroen bestaat, hebben als eigenschap dat zij bepaalde golflengten kunnen absorberen en andere reflecteren. Bij een citroen is het nu toevallig zo geregeld dat alleen licht dat een '*gele*' golflengte heeft wordt gereflecteerd en alle andere golflengten worden geabsorbeerd. Alleen het gele licht bereikt dus via reflectie ons oog, met als logisch gevolg dat het lijkt alsof deze citroen geel is.
Gekleurde vellen papier, zoals zij door een kleurenprinter worden geproduceerd, werken dus subtractief. Zij zenden immers geen licht uit, maar reflecteren alleen bepaalde golflengten van het licht dat er op invalt. Hoe meer gekleurde inkt er op het papier aanwezig is, hoe meer invallend licht er wordt geabsorbeerd en hoe minder er wordt gereflecteerd. Hoe meer inkt, hoe donkerder het beeld wordt!

Secundaire kleuren C, M en Y

Als gevolg van het fundamentele verschil tussen de productie van kleuren bij een additief en bij een subtractief systeem, werken subtractieve systemen nooit ofte nimmer met de drie natuurkundige basiskleuren rood, groen en blauw. Het grote verschil is immers dat een monitorscherm zwart is en een vel papier wit! Vandaar dat kleurenprinters, of die nu met drukinkten, toners, pigmenten of verven werken, allemaal zonder uitzondering gebruik maken van de zogenoemde '*secundaire*' kleuren.
Dat zijn er ook drie, te weten:

- **Cyaan**
  Cyaan is licht blauw en wordt samengesteld uit de primaire kleuren blauw en groen. Cyaan absorbeert rood licht.
- **Magenta**
  Magenta is vaal rood, wordt samengesteld uit de primaire kleuren rood en blauw en absorbeert alles dat groen is.
- **Geel**
  Geel (Yellow) is gewoon geel, wordt samengesteld uit de primaire kleuren rood en groen en absorbeert blauw.

Dit systeem door het leven onder de naam '*CMY*'.



De drie secundaire kleuren in het 'CMY-systeem'.
(© 2024 Jos Verstraten)

Eigenschappen van kleuren
Kleuren worden gedefinieerd door drie belangrijke eigenschappen:

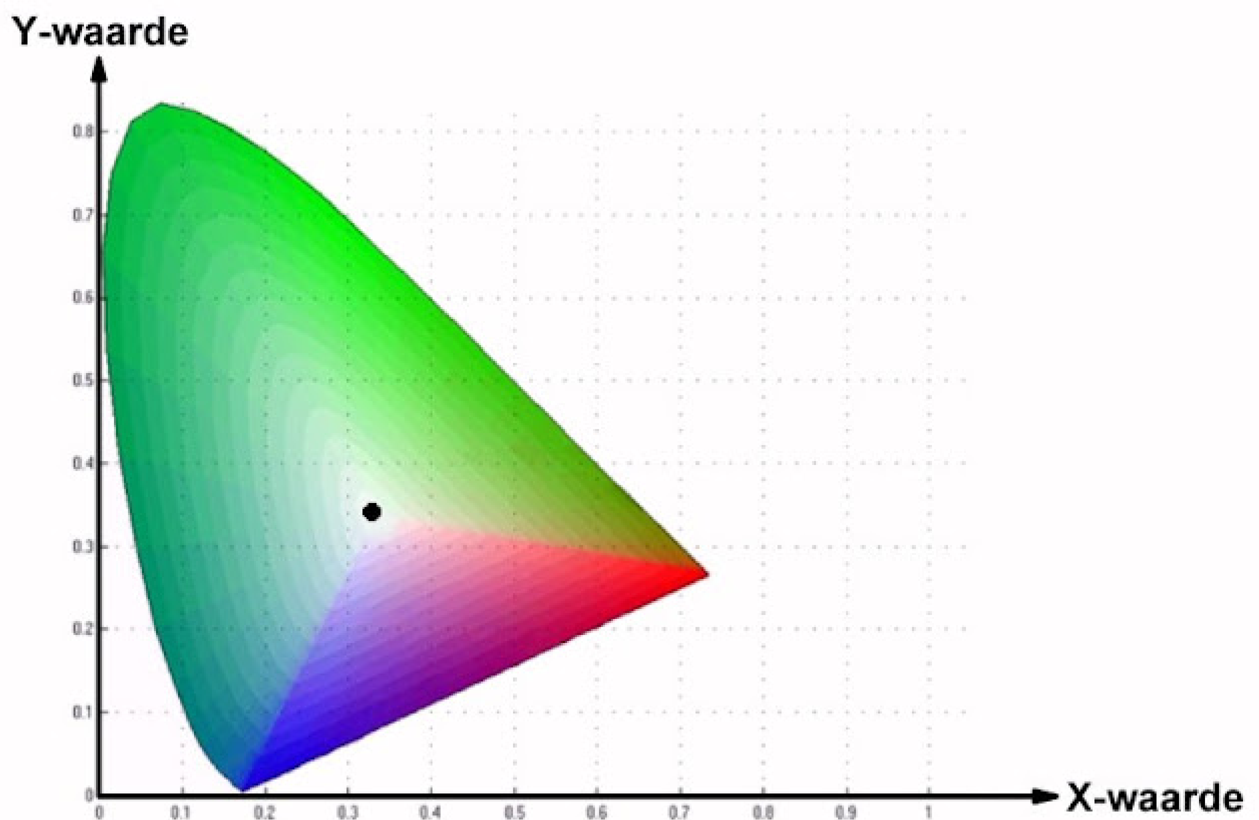
- **De tint (hue)**
  De tint kan het best beschreven worden als de voornaamste primaire kleur die in een mengkleur aanwezig is. De tint van vleeskleur is bijvoorbeeld rood, de tint van de lucht is blauw. Maar de tint van roze, paars of bruin is ook rood. Natuurkundig uitgedrukt is de tint de overheersende golflengte van een van de drie primaire kleuren die in de mengkleur aanwezig is. In het Engels wordt de tint aangegeven door het begrip '*hue*'.
- **De helderheid (brightness)**
  De helderheid kan het best omschreven worden als de donkerte van een bepaalde kleur. Licht groen heeft een grotere helderheid dan donker groen, hoewel in beide gevallen de primaire kleur groen overheersend is. Natuurkundig bekeken kan helderheid worden uitgedrukt als de intensiteit van de overheersende golflengte in de mengkleur. In het Engels wordt de helderheid van een kleur '*brightness*' genoemd.
- **De verzadiging (saturation)**
  De kleurverzadiging is een begrip dat heel goed is waar te nemen, maar heel moeilijk is te omschrijven. Een bepaalde kleurtint kan sprankelend en levendig zijn, maar ook

onopvallend grijzig. Het zal duidelijk zijn dat de verzadiging heel veel met de helderheid te maken heeft. Natuurkundig gesproken bevat een verzadigde kleur heel veel straling van een van de drie primaire kleuren en heel weinig straling van de twee overige primaire kleuren. In het Engels wordt deze eigenschap van kleur '*saturation*' genoemd.

Het definiëren van kleuren
Moderne monitoren kunnen niet minder dan 16.777.216 verschillende kleuren genereren. Hoe nu al deze kleuren van elkaar te onderscheiden? Het zal duidelijk zijn dat het weinig zin heeft namen toe te kennen. '*Citroengeel*' of '*Komkommergroen*' zijn te wazige begrippen om er mee te kunnen werken. Vandaar dat er internationaal een aantal kleurensystemen is ontwikkeld, waarvan wel de meest bekende zijn:

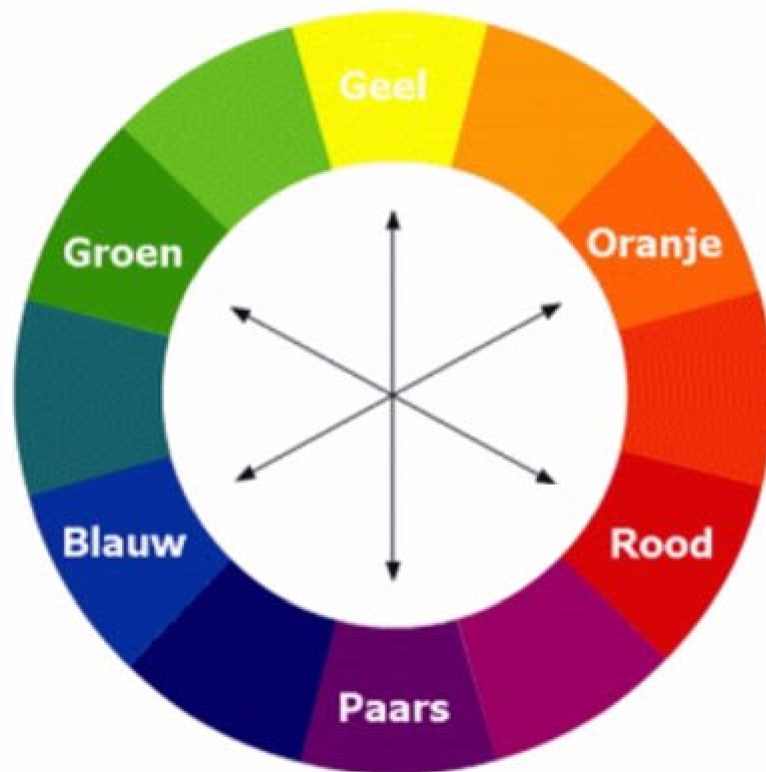
- De kleurendriehoek volgens DIN 5033
- De kleurencirkel
- Het PMS-systeem

De kleurendriehoek
Uit de drie primaire kleuren rood, groen en blauw kunnen, zoals reeds beschreven, door additieve menging miljoenen kleuren samengesteld worden. Al die kleuren kunnen overzichtelijk worden samengevat in de '*kleurendriehoek*'. Zoals getekend in de onderstaande figuur bestaat die driehoek uit een assenstelsel met twee coördinaten X en Y. Dit kleurcoördinatensysteem is genormd volgens DIN 5033 en wordt internationaal toegepast. De drie primaire kleuren R, G en B liggen op de hoekpunten van de driehoek. Langs de zijden van de driehoek gaat de kleur geleidelijk over van de ene kleur in de andere. Tussen de rode en de groene hoek wisselen de kleuren, net zoals bij een regenboog, van rood via geel naar groen. Iedere kleur kan nu gemakkelijk gedefinieerd worden door er een X- en een Y-waarde aan toe te kennen. De primaire kleur groen heeft bijvoorbeeld een X-waarde van ongeveer 0,2 en een Y-waarde van ongeveer 0,7.
Het zogenoemde '*witpunt*' (de zwarte punt in de grafiek), het punt waar uit een bepaalde menging van de drie primaire kleuren wit ontstaat, ligt bij X = 0,3318 en Y= 0,3346.



De volgens DIN 5033 genormeerde internationale kleurendriehoek.
(© bs-ballasts, edit 2024 Jos Verstraten)

De kleurencirkel
Uit de kleurendriehoek kunt u gemakkelijk de kleurencirkel van de onderstaande figuur afleiden. U moet zich dan voorstellen dat de kleurendriehoek R-G-B uit een gekleurd snoer bestaat dat rond drie spijkers is gespannen. Verwijdert u de spijkers en legt u het snoer in een cirkel, dan ontstaat de kleurencirkel.



De kleurencirkel. (© beeldendevormingbroklede)

Het PMS-systeem
PMS is het letterwoord van '*Pantone Matching System*'. Het PMS-systeem bestaat uit een kleurenwaaier die duizenden kleuren bevat. Iedere kleur heeft een bepaald nummer. Van iedere kleur is bovendien tot op de procent nauwkeurig gedefinieerd hoe die kan worden samengesteld uit de primaire kleuren rood, groen en blauw of uit de secundaire kleuren cyaan, magenta en geel. Het PMS-systeem definieert dus zowel het additieve als het subtractieve mengproces.
Betere grafische programma's, zoals '*Corel Draw*', hebben de mogelijkheid om kleuren samen te stellen volgens het PMS-systeem. Wilt u een bepaald vlak op het scherm vullen met een PMS-kleur, dan volstaat het dit element van het ontwerp aan te klikken, een venster te openen en de PMS kleurencode in te vullen. Het programma stuurt dan zoveel rood, groen en blauw naar het scherm dat de gewenste tint ontstaat. Hetzelfde geldt nadien bij het printen van deze kleur. Goede printerdrivers van kleurenprinters zijn in staat de PMS-code van ieder kleur te achterhalen en de noodzakelijke combinatie van cyaan, magenta en geel op het papier te spuiten.



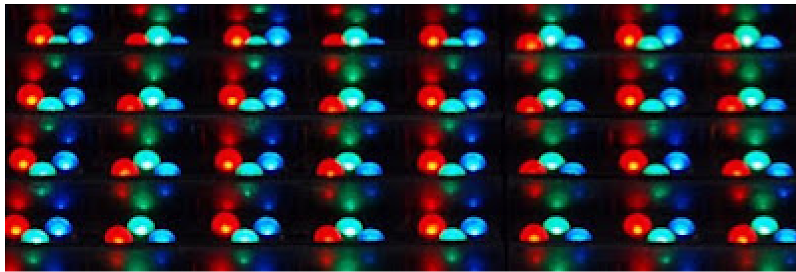
De Pantone kleurenwaaier. (© Pantone LLC x-rite)

Scherm/papier-compatibiliteit
Die PMS-compatibiliteit vormt het grootste probleem bij het ontwerpen van documenten die kleuren bevatten. Als alle gebruikte software PMS-compatibel is, zijn er minimale problemen te verwachten. Hoewel, de kalibratie van het beeldscherm en de eigenschappen van het papier spelen zelfs dan een belangrijke rol (zie later)!
Als echter het door u gebruikte grafisch programma kleuren op een eigen manier samenstelt is het maar helemaal de vraag of de driver van uw kleurenprinter die eigen codering kan ontcijferen. Het gevolg kan dan zijn dat iets dat licht groen op het beeldscherm verschijnt, licht paars wordt afgedrukt.

Complementaire kleuren
Tot slot van deze korte introductie in de kleurenleer moet nog even aandacht worden besteed aan een belangrijk begrip, namelijk '*complementaire kleuren*'. Complementaire kleuren zijn kleuren die zich op de kleurencirkel tegenover elkaar bevinden. Complementaire kleuren zijn dus rood en groen of oranje en blauw. Het menselijk oog heeft iets met complementaire kleuren. Uit ervaring blijkt bijvoorbeeld dat het heel onverstandig is complementaire kleuren in een en dezelfde lay-out te verwerken!

Kleuren weergeven op een beeldscherm

Het RGB-systeem van de monitor
Zoals reeds geschreven, werkt een monitor additief. Er moeten dus lichtbronnen aanwezig zijn, die licht uitstralen. Die lichtbronnen zitten in het beeldscherm onder de vorm van zogenoemde pixeldriehoeken (pixel triplets). Dat zijn uiterst kleine driehoekjes, die ieder weer zijn opgebouwd uit drie elementjes. Dat kunnen mini-LED's zijn of LCD-dot's. Deze elementjes zijn een fractie van een millimeter groot! In ieder driehoekje bevinden zich een rood, een groen en een blauw licht uitstralend elementje. De elektronica in de monitor stuurt deze elementjes individueel aan. Op deze manier is het mogelijk zo'n driehoekje gelijk welke kleurt te laten uitstralen. Vanaf een afstand bekeken ziet het menselijk oog die drie elementjes namelijk niet meer individueel, maar vangt het samengestelde spectrum op.



LED-triplets op het scherm van een TV. (© Komatta, Wikimedia Commons)

Opmerking
In LCD-schermen zijn de driehoekvormige triplets vaak vervangen door rechthoekvormige triplets, omdat constructief bekeken het gemakkelijker is deze via een X/Y-matrix aan te sturen.

Kleuren mengen op het scherm
Het volledig scherm van de monitor bevat tienduizenden van deze pixeldriehoeken. Als de elektronica alleen de groene elementen aanstuurt, zal het gehele scherm groen oplichten. Worden de drie kleurkanalen R, G en B digitaal aangestuurd, dus '*UIT*' of '*AAN*', dan kan men met dit RGB-systeem acht kleuren produceren.

KLEUR	ROOD	GROEN	BLAUW
	UIT	UIT	UIT
	AAN	UIT	UIT
	UIT	AAN	UIT
	UIT	UIT	AAN
	AAN	AAN	UIT
	AAN	UIT	AAN
	UIT	AAN	AAN
	AAN	AAN	AAN

De acht kleuren die bij AAN/UIT-sturing van R, G en B mogelijk zijn.
(© 2024 Jos Verstraten)

16.777.216 kleuren
Alle moderne grafische elektronische systemen hebben echter voor ieder van de drie kleuren acht bits ter beschikking. Dat betekent dat ieder van de drie primaire kleuren in intensiteit kan worden gestuurd en wel in niet minder dan 256 verschillende stappen. Dat betekent dat het systeem in staat is in totaal 256 x 256 x 256 = 16.777.216 verschillende kleurtinten op het scherm te zetten.

Een tamelijk grote overkill
De mens kan echter naar schatting maar ongeveer één miljoen verschillende kleurtinten onderscheiden. In het menselijk oog zitten drie typen kegeltjes die gevoelig zijn voor verschillende golflengten van licht: lange (L, gevoelig voor rood), middel (M, gevoelig voor groen) en korte (S, gevoelig voor blauw) golflengten. Door de variaties in lichtintensiteit en de

verschillende combinaties van de kegeltjes die worden gestimuleerd, kan de mens een groot aantal kleurtinten onderscheiden. Het exacte aantal kan echter variëren afhankelijk van factoren zoals verlichting, context en individuele verschillen in de perceptie van kleur. Echter, 16.777.216 verschillende kleurtinten waarnemen valt volledig buiten het bereik van de mens! Een heleboel grafische programma's maakt hiervan handig gebruik om de omvang van kleurenfoto's te reduceren. Het programma onderzoekt de R/G/B-samenstelling van alle pixels van de foto. Als aanliggende pixels samenstellingen hebben die dicht bij elkaar liggen, dan worden deze gemiddeld. Hierdoor ontstaan in de datastroom een heleboel opeenvolgende identieke R/G/B-data, die door middel van de bekende wiskundige algoritmen zoals '*run length codering*' en '*entropie codering volgens Huffmann*' efficiënt in omvang kunnen worden gereduceerd. Vaak is het met dergelijke programma's mogelijk een foto met een omvang van 10 MB te reduceren tot een bestand van 1 MB zonder dat u daar iets van merkt. Alle illustraties op dit blog worden op deze manier gecomprimeerd.

Kleuren weergeven met een printer

Het CYMK-systeem van de printer
Het kleurprocédé van een printer werkt geheel anders, namelijk volgens het subtractieve principe. Papier straalt natuurlijk geen licht uit. Het witte omgevingslicht valt op het papier, dringt door de transparante inkten heen en wordt nadien teruggekaatst door het papier. Bepaalde golflengten worden hierbij geabsorbeerd, andere doorgelaten. Moderne kleurenprinters beschikken over vier inktpatronen, waarvan er drie meestal in één inktcartridge verwerkt zitten:
- Cyaan (C)
- Geel (Y van Yellow)
- Magenta (M)
- Zwart (K van blacK)

Als men cyaan, magenta en yellow over elkaar heen spuit, ontstaat geen écht zwart, maar een zeer donkerbruine tint, die een erg smerig zwart oplevert. Vandaar dat men, noodgedwongen, een vierde inktpatroon moet gebruiken dat gevuld is met echt zwarte inkt. Het mechanisme van de printer stuurt de constructie, waarin de inktpatronen gemonteerd zijn, heen en weer over het papier. Via de '*nozzles*', uiterst kleine spuitmondjes, kunnen microscopisch kleine druppeltjes inkt op het papier worden gespoten. Op deze manier kunnen weer acht verschillende kleuren geproduceerd worden. Spuit men namelijk op een en dezelfde plek twee kleuren, dan zullen deze kleuren zich mengen tot een mengkleur.

KLEUR	CYAAN	YELLOW	MAGENTA	BLACK
	UIT	UIT	UIT	UIT
	AAN	UIT	UIT	UIT
	UIT	AAN	UIT	UIT
	UIT	UIT	AAN	UIT
	UIT	UIT	UIT	AAN
	AAN	AAN	UIT	UIT
	AAN	UIT	AAN	UIT
	UIT	AAN	AAN	UIT

De acht kleuren die bij AAN/UIT-sturing van C, Y, M en K mogelijk zijn.
(© 2024 Jos Verstraten)

Mengen van de vier inktkleuren
Het zal duidelijk zijn dat de inkt uit de vier inktpatronen gemengd moet worden om de duizenden mengkleuren te printen die moderne grafische elektronica op het scherm kan

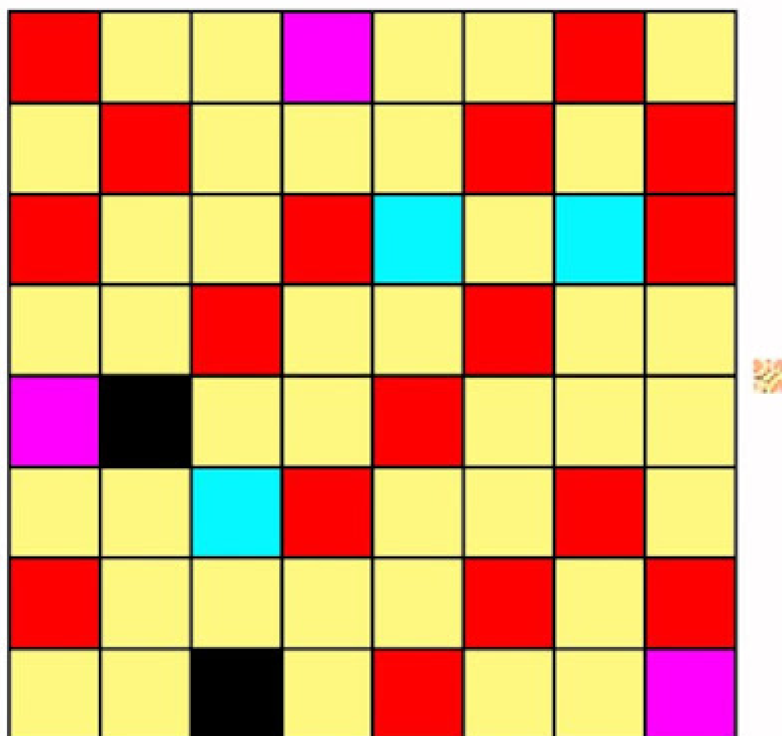
zetten. Het toegepaste mengprocédé is afhankelijk van de mogelijkheden van de printer. Men heeft vier systemen ontwikkeld:

- Subtractieve dithercellen
- Amplitude gemoduleerd rasteren (AM)
- Frequentie gemoduleerd of stochastisch rasteren (FM)
- Hybride rasteren

Subtractieve dithercellen
Subtractief ditheren is een procédé, waarbij kleurtinten worden geproduceerd door diverse basiskleuren aan te brengen in dithercellen. Een dithercel bestaat bijvoorbeeld uit acht bij acht inktdotjes. Ieder van die 64 inktpuntjes kan nu gevuld worden met een van de acht mogelijke basiskleuren. Bekijkt u een geditherde afdruk met een vergrootglas, dan zijn die afzonderlijke inktpuntjes goed waarneembaar. Op enige afstand echter, vloeien deze kleine inktpuntjes samen en ontstaat de indruk van een mengkleur. In de onderstaande figuur wordt het subtractieve dithering-procédé voorgesteld. De dithercel van 8 bij 8 inktpunten wordt gevuld met:

- 2 x zwarte inkt
- 3 x magenta inkt
- 3 x cyaan inkt
- 17 x rode inkt (geel + magenta)
- 39 x gele inkt

Het resultaat is een vleesachtige kleur. Om dit een beetje duidelijk te maken hebben wij de dithercel erg verkleind en weergegeven rechts naast het grote exemplaar. Maar... die afmetingen zijn uiteraard nog vele malen groter dan de échte afmetingen van zo'n cel op het papier.



Door een 8 bij 8 dithercel te vullen met zwart, geel, cyaan, magenta en rood, ontstaat een huidkleur. (© 2024 Jos Verstraten)

Soorten dithering
Een subtractieve dithercel kan op verschillende manieren worden samengesteld. De twee meest toegepaste systemen zijn:

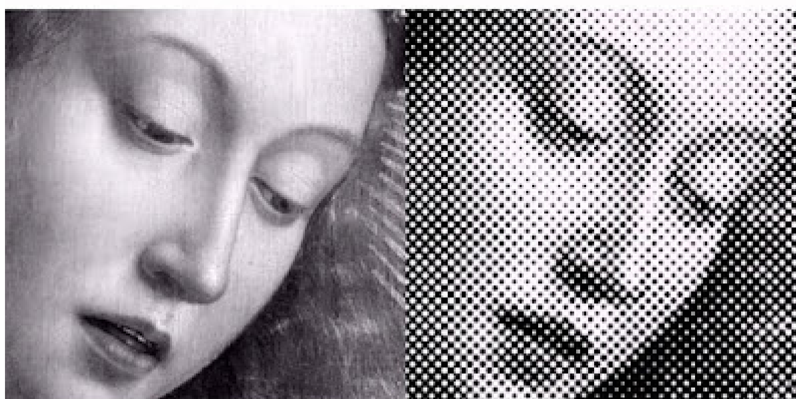
- Patroon
- Verstrooid

Bij '*patroon*' wordt iedere dithercel die een bepaalde tint moet voorstellen op dezelfde manier met inktpuntjes gevuld. Het nadeel van deze methode is dat vanaf een afstand bekeken

regelmatige geometrische patronen kunnen ontstaan, die heel erg storend werken.
Bij '*verstrooid*' worden dithercellen die dezelfde tint moeten voorstellen op een willekeurige manier gevuld met de noodzakelijke kleurpunten. De verdeling naar aantal blijft uiteraard identiek per cel, alleen de plaats waar de puntjes worden geprint verschilt op een willekeurige manier van cel tot cel. De kans op geometrische patronen wordt hierdoor verkleind. Wél ontstaat nu de kans dat in vier naast elkaar gelegen hoeken van vier cellen een opeenhoping van een bepaalde inktkleur ontstaat, waardoor in een groot vlak dat egaal met een bepaalde tint moet worden gevuld plaatselijk kleine kleurafwijkingen kunnen ontstaan.
Het verstrooid ditheren wordt ook wel eens '*toevoegen van ruis*' genoemd, omdat de software op een semi-willekeurige manier de dithercellen vult. Ruis is immers ook een willekeurig verschijnsel.

Dithering en resolutie
De meeste moderne kleurenprinters hebben een basisresolutie van 1.200 dpi (dots per inch). Door echter te ditheren gaat de resolutie dramatisch dalen! Iedere dithercel kan immers maar één welbepaalde kleurtint representeren. Als met dithercellen van 8 bij 8 inktpuntjes toepast, daalt de resolutie tot 1.200 gedeeld door 8 is gelijk aan 150 dpi! Vandaar dat men in de meeste gevallen met kleinere dithercellen werkt en met minder reproduceerbare kleuren genoegen neemt.

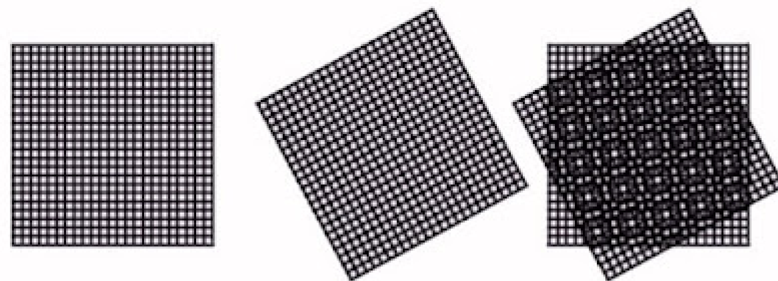
Wat is rasteren?
Als u een foto in een krant of tijdschrift met een goed vergrootglas bekijkt zult u vaststellen dat de op het oog grijze vlakken opgebouwd zijn uit een heleboel kleine, zwarte puntjes. Die puntjes staan zo dicht op elkaar dat het oog alleen maar de gemiddelde zwarting registreert, waardoor in onze hersenen het idee van een grijze tint ontstaat. De mate van grijsheid is niet afhankelijk van het aantal puntjes (dat is voor een bepaalde foto constant over het volledige oppervlak) maar van de grootte van de puntjes. In de onderstaande figuur is een met de computer gesimuleerde extreme vergroting van een krantenfoto weergegeven. U merkt duidelijk op dat de puntjes in een horizontaal en verticaal raster zijn aangebracht en dus op gelijke afstanden van elkaar staan. Alleen de grootte van de puntjes is afhankelijk van de grijstint die weergegeven moet worden. De puntjes noemt men de '*cellen*' van het raster. Deze techniek noemt men '*rasteren*' of '*halftoning*' in het Engels. Deze techniek wordt ook in printers toegepast om zoveel mogelijk kleurtinten uit de beschikbare printkleuren te kunnen weergegeven.



Het simuleren van grijstinten door het rasteren van een foto.
(© slideshare)

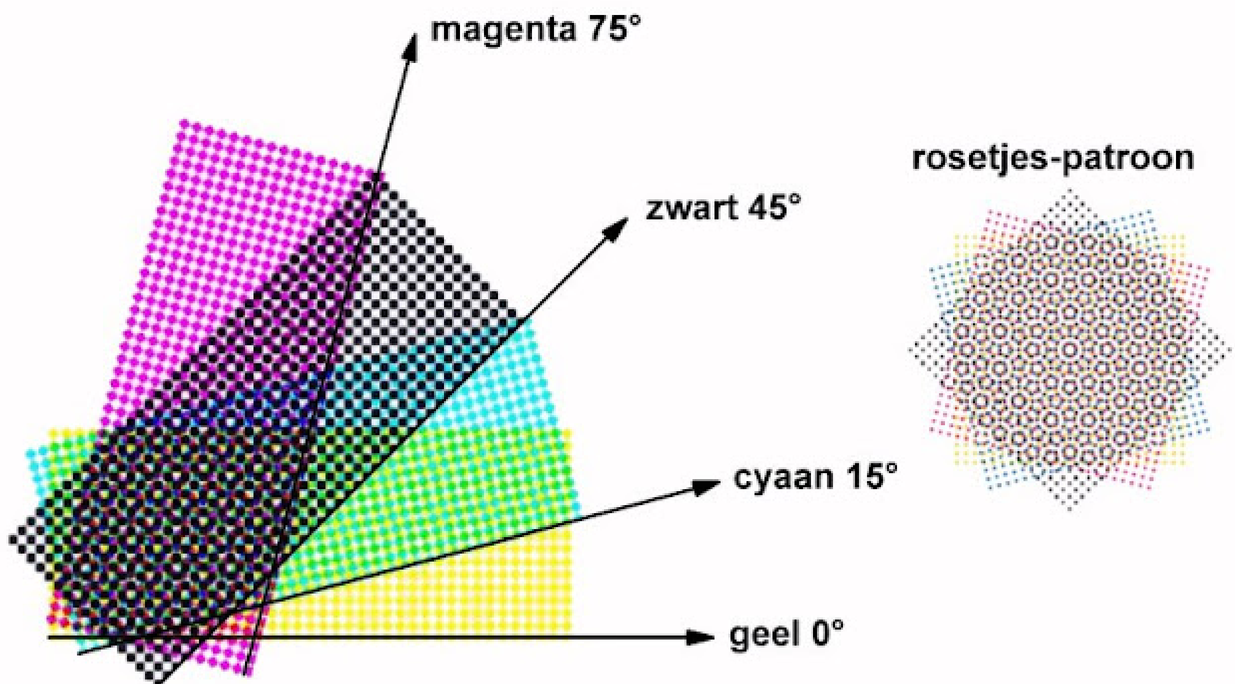
Amplitude gemoduleerd rasteren (AM)
Omdat er met vier kleuren wordt gewerkt (cyaan, magenta, geel en zwart) moet men vier keer rasteren. En dat veroorzaakt extra problemen! Het zal duidelijk zijn dat die rasters niet zo maar willekeurig over elkaar heen gedrukt kunnen worden. Het is zelfs absoluut noodzakelijk dat de rasterpuntjes van de vier drukkleuren grotendeels naast elkaar in plaats van over elkaar worden gedrukt.
Een van de grootste uitdagingen bij het AM-rasteren van kleuren in het vermijden van het zogenoemde '*moiré-effect*'. Dit effect wordt toegelicht aan de hand van de onderstaande

figuur. In deze tekening worden twee rasters onder een willekeurige hoek over elkaar heen gezet. Zoals duidelijk uit de figuur blijkt ontstaat er een merkwaardig en zeer regelmatig verlopend geometrisch motief. Dit verschijnsel wordt het moiré effect genoemd. Het variëren van de hoek tussen de twee rasters met een paar graden kan een heel ander geometrisch patroon tot gevolg hebben. Het zal duidelijk zijn dat men het moiré-effect in de praktijk kan missen als kiespijn. Vandaar dat men een optimale hoek tussen de vier rasters moet zoeken, waarbij dit effect minimaal optreedt.



Het verschijnsel 'moiré-effect' toegelicht. (© Nikkon)

De optimale rasterhoeken
In de praktijk werkt men meestal met het rasterschema dat voorgesteld is in de onderstaande figuur. Het gele (Yellow) raster staat loodrecht op de papier oriëntatie. De drie overige rasters hebben hoeken van 15, 45 en 75 graden ten opzichte van het gele raster. Door de exacte keuze van de rasterhoeken ontstaan zogenoemde '*rozetjes*'. Zo'n rozetjes-patroon is in de figuur rechts vergroot voorgesteld en is de basis waarmee men kleurtinten print met het AM-systeem.



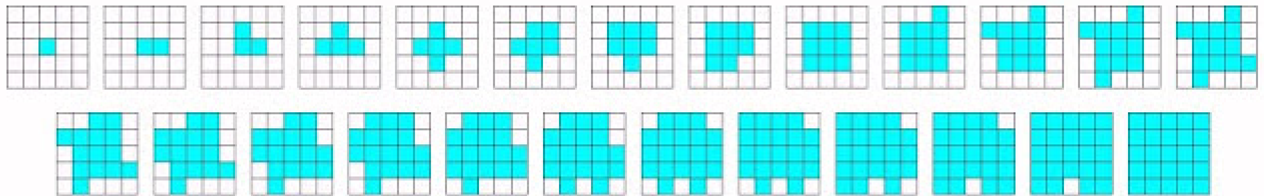
De onderlinge positie van de vier rasters en de daardoor gevormde rozetjes.
(© researchgate, edit 2024 Jos Verstraten)

De rastercellen
De vier rasters zijn samengesteld uit gekleurde puntjes die men de '*cellen*' van het raster noemt. Die kunnen met minder of meer inkt worden opgevuld. Om dit te realiseren wordt iedere cel samengesteld uit en raster van vijf bij vijf inktdotjes. Naarmate de intensiteit van de kleur moet toenemen, worden meer dotjes in de cel met inkt gevuld. Per kleur kan men dus 26 verschillende intensiteiten aanbrengen, van een volledig lege cel tot een volledig volle cel. Omdat men met drie kleurenrasters werkt kan men in totaal 26 x 26 x 26 is gelijk aan 17.576 verschillende mengkleuren samenstellen. Let op dat het zwarte raster niet meetelt bij het

berekenen van het aantal af te drukken kleuren! Het zwarte raster wordt alleen gebruikt om de echt zwarte tinten in het ontwerp te printen.

De spot-functie

Een belangrijk begrip bij amplitude gemoduleerd rasteren in de zogenoemde '*spot-functie*'. Deze functie beschrijft de volgorde waarin de 25 dots van een rastercel worden gevuld met inkt naarmate de intensiteit van de kleur moet toenemen. Daarvoor zijn door de printerfabrikanten diverse algoritmes ontwikkeld, die uiteraard allemaal beloven dat zij de beste kleurenweergave geven. In de onderstaande figuur is een van die algoritmes uitgewerkt.



De 25 mogelijke intensiteiten van één van de vele spot-functies. (© 2024 Jos Verstraten)

Sommige programma's, zoals '*Illustrator*' van Adobe, bieden de mogelijkheid de spot-functie van het raster aan te passen. U kunt dan voor ieder van de 25 mogelijke kleurintensiteiten een eigen indeling van al dan niet te printen inktdotjes definiëren. Ook in een printertaal zoals '*Postscript*' bestaat de mogelijkheid de spotfunctie van het raster vrij te definiëren.

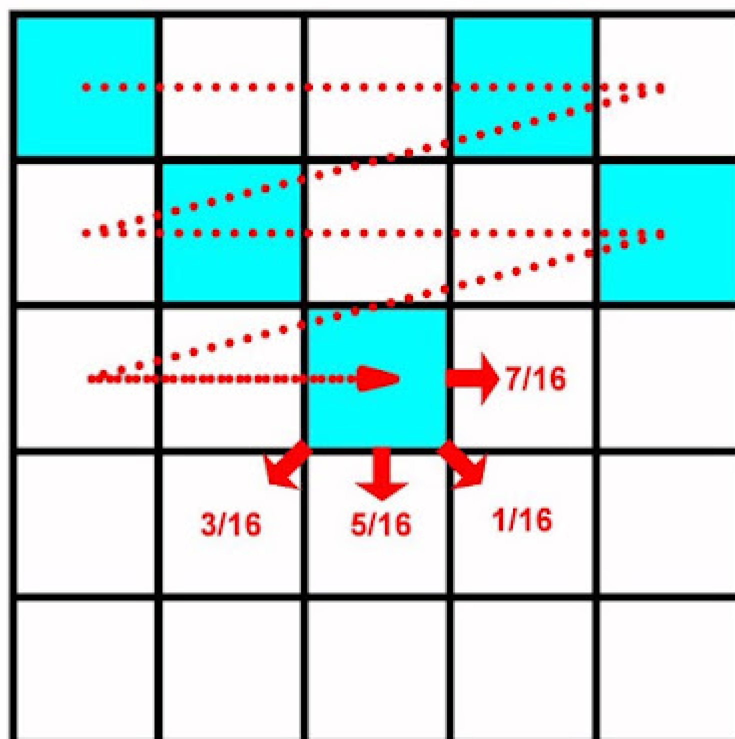
Frequentie gemoduleerd of stochastisch rasteren (FM)

Het grote probleem bij amplitude gemoduleerd rasteren is het vermijden van moiré. Het regelmatige geometrische patroon van de rastercellen van de ene kleur interfereert met de regelmatige geometrische patronen van de rasters van de andere kleuren, waardoor ongewenste effecten kunnen ontstaan. Om dit probleem op te lossen heeft men gezocht naar een systeem, waarbij er geen regelmatige patronen in de rasters ontstaan. Men kan dan de vier rasters onder willekeurige hoeken over elkaar printen, zonder kans te lopen dat moiré-patronen ontstaan. Deze rastersystemen worden samengevat onder de naam '*frequentie gemoduleerd rasteren*' of '*stochastisch rasteren*'. Bij deze systemen werkt men niet met rastercellen, maar met de individuele inktdotjes van de printer. Via ingewikkelde wiskundige systemen wordt bepaald welke dot's wél en welke dot's niet geprint moeten worden om een bepaalde intensiteit van de kleur tot stand te brengen.

Error diffusion

Die ingewikkelde wiskundige algoritmen werken volgens het principe van de '*error diffusion*'. Bij het rasteren ontstaan steeds kleurfouten, omdat de 16.777.216 kleuren van het beeldscherm moeten worden omgezet in een door de technologie beperkt veel kleiner aantal. Bij AM-rasteren ontstaan deze afrondingsfouten natuurlijk in de rastercel zélf. Bij FM-rasteren wordt gepoogd deze fouten uit te smeren over een groter deel van de afdruk. Aan de hand van de onderstaande figuur wordt een poging gewaagd de techniek van error diffusion toe te lichten.
In deze figuur zijn 25 inktdotjes voorgesteld. Deze kunnen of geprint worden, of leeg blijven. De software behandelt de dotjes lijn na lijn, van boven naar onder en van links naar rechts. Als voorbeeld wordt het middelste dot besproken. De error diffusion techniek berekent, aan de hand van het origineel, de intensiteit van de te drukken kleur. Stel dat de software berekent dat de intensiteit van de kleur in dit specifieke dot gelijk is aan 83 %. Omdat deze waarde boven 50 % ligt, wordt het dotje geprint. Zou de berekende intensiteit onder 50 % liggen, dan zou het dotje niet worden geprint. Er is nu echter een intensiteitsfout van niet minder dan 33 % opgetreden. Deze fout wordt verwerkt in de vier dot's die nog niet onder handen zijn genomen en die naast het te berekenen dot liggen. Deze vier dotjes zijn voorgesteld door middel van pijltjes. In ieder dotje is ook ingetekend met welke factor de fout in ieder dotje gecorrigeerd wordt.
In het dotje dat er rechts naast ligt wordt de fout dus met 7/16 gecorrigeerd. Dat betekent dat de software, bij het berekenen van de invulling van dit dotje, 7/16 van de foutwaarde van het

vorige dotje in de berekening verwerkt. Als zou blijken dat de intensiteit van dit dotje 45 % is, dan wordt hierbij 33 % maal 7/16 = 14,43 % opgeteld, zijnde de correctiewaarde van het vorige dotje. In totaal wordt dus de gecorrigeerde intensiteit van dit dotje 59,43 %. Zonder error diffusion zou dit dotje dus niet geprint worden (intensiteitswaarde onder 50 %), met error diffusion wordt het wél geprint.

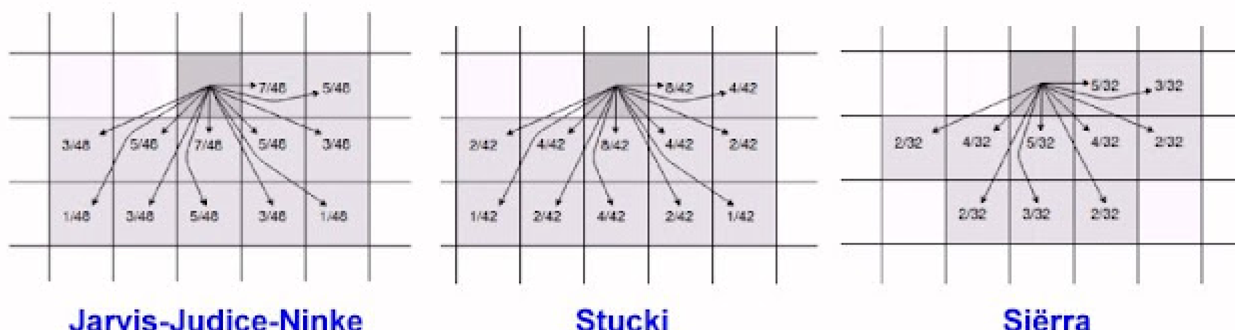


Het principe van 'error diffusion'. (© 2024 Jos Verstraten)

Het begrip filter-matrix
Wat voor AM-rasters de spot-functie is, is voor FM-rasters de '*filter-matrix*'. Die matrix definieert het aantal inktdotjes waarin wordt gecorrigeerd en de correctiefactoren die in die dotjes worden toegepast. Het zal duidelijk zijn dat de kwaliteit van de uiteindelijke kleurenafdruk via vier FM-rasters voor een belangrijk deel afhankelijk is van de toegepaste filter-matrix.
Het besproken systeem, met vier correctiedotjes en coëfficiënten van 7/16, 5/16, 3/16 en 1/16, werd ontwikkeld door Floyd en Steinberg. Daarnaast zijn er tal van andere matrixen ontwikkeld en uitgeprobeerd, zoals deze van:

- Jarvis-Judice-Ninke
- Stucki
- Sierra

De samenstelling van deze drie filter-matrixen is voorgesteld in de onderstaande figuur.



Drie andere vaak toegepaste filter-matrixen. (© researchgate)

Voordelen van FM-rasteren

FM-rasters hebben tal van voordelen, waarvan de voornaamste nu in het kort worden samengevat:

- Geen interferenties
  Omdat gedrukt wordt zonder geometrische rasters, ontstaan geen interferentiepatronen, zoals moiré. Ook interferentie met het beeld zélf, zoals bij de afdruk van een kostuum met een visgraat motief, is onmogelijk.
- Geen zichtbare rozetten
  De bij AM-rasters zo specifiek aanwezige rozetjes ontbreken volledig.
- Meer details
  Bij een bepaalde rasterfrequentie lijkt het alsof FM-rasters meer details weergeven dan AM-rasters. Blijkbaar wordt het menselijk brein minder afgeleid door de bij FM afwezige rastergeometrie en is daardoor in staat een hogere scherpte-indruk te vormen.
- Zuiverder kleurverlopen
  Kleurverlopen, afgedrukt met FM-rasters, zien er gladder uit dan deze afgedrukt met AM-rasters.
- Minder registerfouten
  Bij AM-drukwerk valt het onmiddellijk op als de vier rasters niet op de juiste positie worden geprint, bijvoorbeeld omdat de vier nozzles in de printkop slecht zijn uitgelijnd. Dat noemt men '*registerfouten*'. Die fouten uiten zich in storende beeldranden of onscherpte. Dezelfde registerfouten zijn veel minder zichtbaar bij FM.

Nadelen van FM-rasteren
Frequentie gemoduleerd rasteren heeft echter ook nadelen:

- Korreligheid
  Kleurvlakken in een egale kleur of met weinig kleuren vertonen vaak een hinderlijke korreligheid, een verschijnsel dat bij AM niet aanwezig is.
- Puntverbreding probleem
  Bij het afdrukken op een printer zullen de inktdotjes altijd iets groter zijn dan eigenlijk zou moeten. Dit wordt veroorzaakt door het uitsmeren van de kleuren over het papier of door het platwalsen van de tonerdotjes bij laserprinters. Dit verschijnsel wordt '*dot gain*' genoemd. Dot gain speelt ook bij AM een belangrijke rol, maar blijkt bij FM nog veel kritischer te zijn.
- Meer tonerverbruik
  Uit praktijkproeven blijkt dat FM-afdrukken veel meer toner of inkt gebruiken dan AM-afdrukken. De prijs per afdruk ligt dus iets hoger.

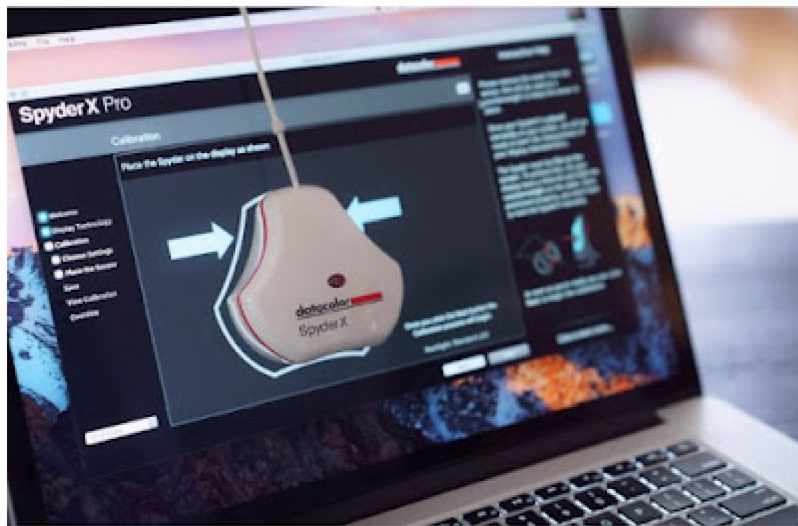
Hybride rasters
Tot slot nog enige zinnen over hybride rasters. Bij deze techniek worden combinaties berekend van traditionele AM-rasters en moderne FM-rasters. Een hybride raster kenmerkt zich zowel door variabele afstand tussen de geprinte dotjes (FM-typisch) als door variabele afmetingen van de geprinte inktvlekken (AM-typisch). Op deze manier probeert men de voordelen van beide systemen met elkaar te combineren.

Van beeldscherm naar printer

Beeldscherm/printer compatibiliteit
Er is een aantal factoren, dat er toe bijdraagt dat een foto afgedrukt op papier afwijkt van wat u op uw beeldscherm ziet:
- De kalibratie van het beeldscherm
- De eigenschappen van het papier
- De kleurwaarneming

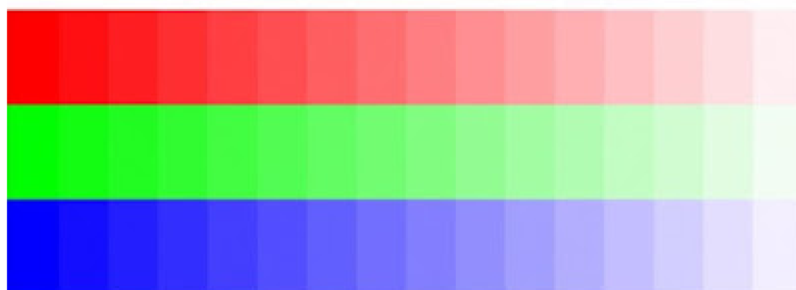
Deze factoren worden in de volgende paragraafjes toegelicht.

De kalibratie van het beeldscherm
Het probleem van uw beeldscherm is dat het drie knoppen heeft, waarmee u de intensiteit, de kleurverzadiging en het contrast kunt instellen. Het gevolg is dat u de kleuren op het scherm zo donker of zo licht en zo fel of flets kunt instellen als u zélf wilt. Een in principe licht gele kleur kan dus, door een verkeerde instelling van contrast, verzadiging en intensiteit, donker geel op het beeldscherm verschijnen. De printersoftware weet echter niets van deze monitor instellingen. Deze software houdt alleen rekening met de kleurcodering die het in het grafisch bestand aantreft. Dit verschijnsel is een van de voornaamste redenen waarom een afdruk op papier zo kan afwijken van de kleuren die u op uw beeldscherm ziet.
De oplossing voor dit probleem is gebruik te maken van beeldscherm kalibratie. Hiervoor is speciale hard- en software in de handel, bijvoorbeeld de 'Datacolor Spyder'. Dit pakket maakt een ICC (*International Color Consortium*) profiel van uw monitor. Dit profiel past de kleurenweergave op uw monitor zó aan dat zij overeen komt met universele kleurstandaarden. De software zet een bepaald kleurenpatroon op het scherm. De hardware bestaat uit een colorimeter waarmee u dat patroon moet aftasten. De software berekent dan bepaalde correctiewaarden die worden opgeslagen in de '*Look Up Table*' (LUT) van de elektronica die uw monitor aanstuurt.



De colorimeter van de 'Datacolor Spyder' in actie. (© lonelyspeck)

Voor de hobbyist is een kleurenkaart een gratis optie
Dat soort utilities is vrij prijzig, voor de 'Datacolor Spyder' betaalt u ongeveer € 250,00. Als het allemaal niet zo nauw komt is het gebruik van een kleurenkaart een gratis optie voor het instellen van uw monitor. Zo'n kleurenkaart bestaat bijvoorbeeld uit zestien blokjes rood, groen en blauw, ieder met een andere kleurverzadiging. Laadt u deze file in uw grafisch programma, dan is het de bedoeling dat u deze zestien blokjes duidelijk van elkaar kunt onderscheiden op uw scherm. Is dat niet het geval, dan moet u contrast, verzadiging en intensiteit van uw beeldscherm bijregelen, tot de zestien blokjes duidelijk van elkaar te onderscheiden zijn.



Een voorbeeld van een kleurenkaart. (© Sony)

De eigenschappen van het papier

De eigenschappen van het gebruikte papier bepalen in grote mate de manier waarop een kleurontwerp wordt afgedrukt. Het papier is immers de '*indirecte lichtbron*', die door min of meer te reflecteren de uiteindelijke kleurindruk bepaalt. Hoe gladder en glanzender het oppervlak van het papier is, hoe helderder en stralender de kleurtinten lijken. Als u hetzelfde ontwerp op ruwer en grijzer papier afdrukt, zullen de stralende kleuren veel fletser lijken. Dat is logisch, want het ruwe en grijze papieroppervlak kaatst minder invallend licht terug. Bovendien zal dit papier de golflengte samenstelling van het teruggekaatste licht veranderen, waardoor er een kleurverschuiving optreedt.
Vandaar dat kleurontwerpen steeds moeten worden afgedrukt op papier dat '*effen wit*' wordt genoemd. Dit papier heeft de eigenschap dat de golflengte samenstelling van het teruggekaatste licht precies gelijk is aan deze van het invallend licht.
Een tweede probleem ontstaat door de oppervlaktestructuur van het papier. Als het papier veel houtvezels bevat ontstaat een verschijnsel dat het '*spinnenweb-effect*' wordt genoemd. De inkt zal zich dan langs deze vezels verspreiden, waardoor de in principe ronde inktspatjes zich uitbreiden tot een soort van miniatuur spinnenweb. Het gevolg is echter dat naast elkaar liggende inktspatjes zich gaan vermengen, waardoor plotselinge kleurovergangen op het scherm in elkaar overvloeien op het papier. Dit noemt men het '*mixen*' van kleuren.

De kleurwaarneming
Kleuren zijn niet statisch, maar dynamisch. De visuele waarneming van een kleurtint hangt van een heleboel externe factoren af, zoals:
- De verlichting
- De achtergrond
- Het papier

De verlichting
Bij een beeldscherm spelen deze factoren een minder belangrijke rol, omdat het beeldscherm een lichtbron is. Het papier is echter alleen een weerkaatser van het licht en die weerkaatsing is uiteraard afhankelijk van het soort licht dat wordt gebruikt. Een kleurafdruk op papier zal er onder daglicht heel anders uitzien dan onder het licht van lampen. Het licht van de zon bevat veel blauwachtige golflengten, terwijl het licht van huiskamerlampen bewust veel meer rode golflengten heeft. Het papier zal dus in het ene geval veel blauwe golflengten terugkaatsen en in het andere geval veel rode. De totaalindruk van het beeld zal in het ene geval een blauw- en in het andere geval een roodverschuiving bevatten. In vaktermen wordt dit verschijnsel '*metametrische kleurverschuiving*' genoemd.

De achtergrond
Ook de achtergrond, waartegen men een kleurontwerp bekijkt, speelt een belangrijke rol bij de kleurindruk. Hiervoor bestaat een aantal eenvoudige regels:

- Donkere kleuren lijken donkerder tegen een donkere achtergrond dan tegen een lichte achtergrond.
- Complementaire kleuren kunnen het best niet gemengd worden, bijvoorbeeld rode kleuren op groen papier, want het resultaat lijkt vaal.
- Wanneer complementaire kleuren naast elkaar worden toegepast, bijvoorbeeld een groen affiche op een rode muur, versterken zij elkaars effect waardoor het resultaat vaak pijn doet aan de ogen.

Het papier
De invloed van het papier op de kleurwaarneming werd reeds eerder beschreven. Er is echter toch nog een punt dat de aandacht verdient. Tegenwoordig kan men papier bestellen in ongeveer alle kleuren van de regenboog. Zwart/wit ontwerpen komen op bijna iedere kleur papier tot hun recht. Met kleurontwerpen ligt dat echter duidelijk anders. Een stelregel: gebruik steeds wit papier, omdat de invloed van gekleurd papier op een gekleurd ontwerp erg moeilijk is in te schatten!